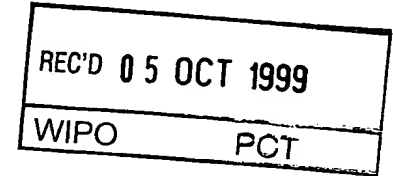


BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

EV

DE 99/1949 09/1763772

**PRIORITY
DOCUMENT**SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)**Bescheinigung**

Die Siemens Aktiengesellschaft in München/Deutschland hat eine Patentanmeldung unter der Bezeichnung

"Verfahren zum Trainieren eines neuronalen Netzes, Verfahren zur Klassifikation einer Folge von Eingangsgrößen unter Verwendung eines neuronalen Netzes, neuronales Netz und Anordnung zum Trainieren eines neuronalen Netzes"

am 25. August 1998 beim Deutschen Patent- und Markenamt eingereicht.

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

Die Anmeldung hat im Deutschen Patent- und Markenamt vorläufig das Symbol G 06 F 17/10 der Internationalen Patentklassifikation erhalten.

München, den 10. August 1999

Deutsches Patent- und Markenamt

Der Präsident

Im Auftrag

Aktenzeichen: 198 38 654.0

Waasmaier

THIS PAGE BLANK (USPTO)



Beschreibung

Verfahren zum Trainieren eines neuronalen Netzes, Verfahren
zur Klassifikation einer Folge von Eingangsgrößen unter Ver-
wendung eines neuronalen Netzes, neuronales Netz und Anord-
nung zum Trainieren eines neuronalen Netzes

Ein neuronales Netz weist Neuronen auf, die zumindest teil-
weise miteinander verbunden sind. Eingangsneuronen des neuro-
nalen Netzes werden Eingangssignale als Eingangsgrößen den
Eingangsneuronen zugeführt. Das neuronale Netz weist übli-
cherweise mehrere Schichten auf. Abhängig von einem Neuron
des neuronalen Netzes zugeführten Eingangsgrößen und einer
für das Neuron vorgesehenen Aktivierungsfunktion generiert
jeweils ein Neuron ein Signal, welches wiederum Neuronen ei-
ner weiteren Schicht als Eingangsgröße gemäß einer vorgebbaren
Gewichtung zugeführt wird. In einer Ausgangsschicht wird
in einem Ausgangsneuron eine Ausgangsgröße abhängig von Grö-
ßen, die dem Ausgangsneuron von Neuronen der vorangegangenen
Schicht zugeführt werden, generiert. Es existieren derzeit im
wesentlichen zwei Ansätze hinsichtlich der Frage, in welcher
Form Information in einem neuronalen Netz gespeichert ist.

Ein erster Ansatz geht davon aus, daß die Information in ei-
nem Neuronalen Netz im Spektralbereich codiert ist. Bei die-
sem Ansatz wird eine zeitliche Folge von Eingangsgrößen der-
art codiert, daß für jeden Zeitreihenwert einer zeitlichen
Folge der Eingangsgrößen jeweils ein Eingangsneuron vorgese-
hen ist, an welches Eingangsneuron der jeweilige Zeitreihen-
wert gelegt wird.

Bei einem neuronalen Netz, welches gemäß diesem Ansatz ausge-
staltet ist, wird üblicherweise als Aktivierungsfunktion eine
tangens hyperbolicus (\tanh) -Funktion verwendet.

Diese erste Art eines neuronalen Netzes wird im weiteren als
statisches neuronales Netz bezeichnet.

Nachteilig an diesem Ansatz ist insbesondere, daß es mit einem statischen neuronalen Netz nicht möglich ist, eine Dynamik eines Prozesses, welchem Prozeß ein technisches System unterliegt, explizit bei der internen Codierung der Folge von Eingangsgroßen zu berücksichtigen.

Die aus [4] bekannten Time-Delay-Neural-Networks (TDNN) versuchen diesem Nachteil dadurch zu begegnen, daß bei einer Mehrzahl von Folgen von Eingangsgroßen für jede Folge und für jeden Zeitreihenwert jeweils ein Eingangsneuron vorgesehen ist. Dieser Ansatz weist insbesondere den Nachteil auf, daß die Dimension des Eingaberaums, repräsentiert durch die Anzahl von Eingangsneuronen, mit wachsender Anzahl zu berücksichtigender unterschiedlicher Folgen von Eingangsgroßen exponentiell wächst.

Mit steigender Anzahl von Neuronen in dem neuronalen Netz ist ferner ein erhöhter Trainingsaufwand unter Verwendung einer mit steigender Anzahl Neuronen steigender Anzahl benötigter Trainingsdaten verbunden. Damit wird ein Trainieren eines statischen neuronalen Netzes unter diesen Bedingungen sehr rechenaufwendig bzw. praktisch nicht mehr durchführbar.

Zum Trainieren eines statischen neuronalen Netzes wird üblicherweise ein gradientenbasiertes Trainingsverfahren beispielsweise das Back-Propagation-Verfahren eingesetzt.

Aus [3] ist ferner für ein statisches neuronales Netz ein Trainingsverfahren bekannt, welches als ALOPEX-Verfahren bezeichnet wird. Bei diesem Verfahren wird das Lernen eines statischen neuronalen Netzes als ein Optimierungsproblem betrachtet. Ziel der Optimierung ist in diesem Fall die Minimierung eines Fehlermaßes E unter Berücksichtigung von in dem statischen neuronalen Netz vorhandenen Gewichte, mit denen die Verbindungen zwischen Neuronen gewichtet sind, für einen vorgegebenen Trainingsdatensatz mit Trainingsdaten.

Ein Trainingsdatum ist ein Tupel, welches Eingangsgrößen, beispielsweise Zustandsgrößen eines technischen Systems bzw. Rahmenbedingungen, denen ein technisches System unterliegt, 5 die einem technischen System zugeführt werden, sowie eine unter den Rahmenbedingungen ermittelte Ausgangsgröße, die von dem technischen System zu den Eingangsgrößen gebildet wird.

Das ALOPEX-Verfahren wird im weiteren im Zusammenhang mit dem 10 Ausführungsbeispiel näher erläutert.

Ein zweiter Ansatz ist darin zu sehen, daß die Information über ein System in dem Zeitbereich und in dem Spektralbereich codiert ist. Ein künstliches neuronales Netz, welches diesem 15 Ansatz Rechnung trägt, weist sogenannte gepulste Neuronen auf und ist aus [2] bekannt.

Ein gepulstes Neuron wird gemäß [1] derart modelliert, daß das Verhalten eines gepulsten Neurons hinsichtlich einer externen Stimulierung, die im weiteren als Eingangsgröße bezeichnet wird, durch eine stochastische Differentialgleichung 20 des Itô-Typs gemäß folgender Vorschrift beschrieben wird:

$$dV(t) = \left(-\frac{V(t)}{\tau} + \mu \right) dt + \sigma dW(t) + w dS(t). \quad (1)$$

25

In der Vorschrift (1) wird mit $dW(t)$ ein Standard-Wiener-Prozeß bezeichnet. Eine vorgegebene Konstante τ beschreibt eine Verzögerung eines Membranpotentials $V(t)$ des modellierten Neurons ohne Eingangsgröße, die an dem Neuron anliegt. 30 Durch das Modell wird ein biologisches Neuron in seinem Verhalten nachgebildet. Aus diesem Grund wird ein gepulstes Neuron auch als biologisch orientiertes Neuron bezeichnet.

Ferner wird mit $S(t)$ eine Kopplung des Neurons mit einem anderen Neuron bezeichnet, d.h. es gilt: 35

$$s(t) = \frac{d}{dt} s(t) = \sum_i \delta(t - t_i), \quad (2)$$

wobei mit t_i eine Ankommzeit bezeichnet wird, zu der ein externer Impuls an einem Eingang eines Neurons ankommt. Eine
 5 soma-synaptische Stärke wird durch eine synaptische Größe w modelliert.

In diesem Modell wird von dem gepulsten Neuron ein Impuls generiert, wenn das Membranpotential $V(t)$ einen vorgegebenen
 10 Schwellenwert Θ erreicht. Nach Generierung des Impulses wird das Membranpotential $V(t)$ des Neurons auf einen vorgegebenen Initialisierungs-Potentialwert $V(0)$ zurückgesetzt.

Eine zeitliche Folge von Impulsen wird somit gemäß folgender
 15 Vorschrift beschrieben:

$$t'_0, \dots, t'_k, \dots, \quad (3)$$

und genügt folgender Vorschrift:

$$o(t) = \sum_k \delta(t - t'_k). \quad (4)$$

Ferner ist aus [1] bekannt, daß unter der Annahme des oben
 25 beschriebenen Modells für ein gepulstes Neuron ein Unterscheidungswert $I(T)$ gebildet werden kann, mit dem angegeben wird, mit welcher Verlässlichkeit eine Folge von Eingangsgrößen korrekt klassifiziert wird hinsichtlich der für ein Training des neuronalen Netzes verwendeten Trainingsdaten.

Der Unterscheidungswert $I(T)$ ist abhängig von Impulsen, die
 30 von den gepulsten Neuronen innerhalb eines Zeitraums $[0; T]$ gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgrößen, die dem neuronalen Netz zugeführt werden. Der Unterscheidungswert $I(T)$ genügt folgender Vorschrift:

$$I(T) = I \left[s; \left\{ \begin{matrix} t_1^{(1)}, \dots, t_m^{(1)}, \dots, t_{k_1}^{(1)}, t_1^{(2)}, \dots, t_m^{(2)}, \dots, t_{k_2}^{(2)}, \dots, \\ t_1^{(n)}, \dots, t_m^{(n)}, \dots, t_{k_n}^{(n)}, \dots, t_1^{(N)}, \dots, t_m^{(N)}, \dots, t_{k_N}^{(N)} \end{matrix} \right\} \right], \quad (5)$$

wobei mit

- s die Eingangsgrößen bezeichnet werden,
- 5 • $t_m^{(n)}$ ein Impuls bezeichnet wird, der von einem gepulsten Neuron n zu einem Zeitpunkt m innerhalb eines Zeitraums $[0, T]$ generiert wird,
- mit k_n ($n = 1, \dots, N$) ein Zeitpunkt bezeichnet wird, zu dem das gepulste Neuron n den innerhalb des Zeitraums $[0, T]$ letzten Impuls generiert hat,
- 0 • N eine Anzahl in dem Neuronalen Netz enthaltener gepulster Neuronen bezeichnet wird.

15 Für ein Neuronales Netz mit einer Mehrzahl von N Neuronen ergibt sich eine stochastische Differentialgleichung des Itô-Typs gemäß folgender Vorschrift beschrieben wird:

$$dV_i(t) = \left(-\frac{V_i(t)}{\tau} + \mu \right) dt + \sigma dW_i(t) + \sum_{j=1}^N w_{ij} \sum_k \delta(t - t_{k-\Delta_{ij}}^{(j)}) dt + I_i(t) dt, \quad (6)$$

20 wobei mit

- $V_i(t)$ ein Membranpotential des i -ten Neurons bezeichnet wird ($i = 1, \dots, N$),
- N eine Anzahl in dem Neuronalen Netz enthaltener Neuronen bezeichnet wird,
- 25 • w_{ij} jeweils ein Gewicht einer Kopplung zwischen dem i -ten und dem j -ten Neuron bezeichnet wird, anschaulich eine synaptische Stärke zwischen den Neuronen i und j ,
- Δ_{ij} eine vorgebbare axonale Verzögerungszeit eines Signals zwischen den Neuronen i und j bezeichnet wird,

- $I_i(t)$ ein externes Stimulierungssignal des Neurons i bezeichnet wird.

Der Erfindung liegt das Problem zugrunde, ein Verfahren sowie
5 eine Anordnung zum Trainieren eines neuronalen Netzes mit gepulsten Neuronen anzugeben. Ferner liegt der Erfindung das Problem zugrunde, ein Verfahren zur Klassifikation einer Folge von Eingangsgrößen unter Verwendung eines neuronalen Netzes mit gepulsten Neuronen sowie ein neuronales Netz mit gepulsten Neuronen anzugeben.
10

Die Probleme werden durch die Verfahren und die Anordnung sowie durch das neuronale Netz mit den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst.
15

Ein Verfahren zum Trainieren eines neuronalen Netzes, welches gepulste Neuronen enthält, weist folgende Schritte auf:

- a) für einen ersten Zeitraum wird das neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird, wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
20
- b) der Unterscheidungswert ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgrößen, die dem neuronalen Netz zugeführt werden,
25
- c) iterativ werden folgende Schritte durchgeführt:
 - der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum verkürzt,
 - für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,
30
 - ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangegangenen Iteration gebildet wird,
35
 - sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte neuronale Netz ist das neuronale Netz der letzten Iteration

tion, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist.

Ein Verfahren zur Klassifikation einer Folge von Eingangsgrößen unter Verwendung eines neuronalen Netzes, welches gepulste Neuronen enthält und gemäß folgenden Schritten trainiert worden ist, weist folgende Schritte auf:

- a) für einen ersten Zeitraum wird das neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird, wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
- b) der Unterscheidungswert ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgrößen, die dem neuronalen Netz zugeführt werden,
- c) iterativ werden folgende Schritte durchgeführt:
 - der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum verkürzt,
 - für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,
 - ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangegangenen Iteration gebildet wird,
 - sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte neuronale Netz ist das neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist,
 - die Folge von Eingangsgrößen wird dem neuronalen Netz zugeführt,
- d) ein Klassifikationssignal wird gebildet, mit dem angegeben wird, welcher Art einer Folge von Eingangsgrößen die zugeführte Folge ist.

Ein neuronales Netz, welches gepulste Neuronen enthält, ist gemäß folgenden Schritten trainiert worden:

- a) für einen ersten Zeitraum wird das neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird, wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
- 5 b) der Unterscheidungswert ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgrößen, die dem neuronalen Netz zugeführt werden,
-
- c) iterativ werden folgende Schritte durchgeführt:
- 10 - der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum verkürzt,
- für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,
- ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten
- 15 Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangegangenen Iteration gebildet wird,
- sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte
- 20 neuronale Netz ist das neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist.

Eine Anordnung zum Trainieren eines neuronalen Netzes, welches gepulste Neuronen enthält, weist einen Prozessor auf, der derart eingerichtet ist, daß folgende Schritte durchführ-

25 bar sind:

- a) für einen ersten Zeitraum wird das neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird, wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
- 30 b) der Unterscheidungswert ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgrößen, die dem neuronalen Netz zugeführt werden,
- 35 c) iterativ werden folgende Schritte durchgeführt:
- der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum ver-

kürzt,

- für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,

5 - ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangegangenen Iteration gebildet wird,

10 - sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte neuronale Netz ist das neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist.

15 Durch die Erfindung wird es möglich, mittels eines neuronalen Netzes, welches gepulste Neuronen enthält, eine zeitliche Folge von Eingangsgrößen zu klassifizieren, wobei gewährleistet ist, daß bei optimierter Klassifikationssicherheit eine minimierte Anzahl von Zeitwerten dem neuronalen Netz zur Klassifikation zugeführt werden müssen.

20

Bevorzugte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

25

Bevorzugt wird zur Maximierung des ersten Unterscheidungswerts und/oder des zweiten Unterscheidungswerts ein nicht gradientenbasiertes Optimierungsverfahren eingesetzt, bevorzugt ein auf dem ALOPEX-Verfahren basierendes Optimierungsverfahren.

30

Der erste Unterscheidungswert genügt vorzugsweise folgender Vorschrift:

$$I(T) = I \left[s; \left\{ \begin{array}{l} t_1^{(1)}, \dots, t_m^{(1)}, \dots, t_{k_1}^{(1)}, t_1^{(2)}, \dots, t_m^{(2)}, \dots, t_{k_2}^{(2)}, \dots, \\ t_1^{(n)}, \dots, t_m^{(n)}, \dots, t_{k_n}^{(n)}, \dots, t_1^{(N)}, \dots, t_m^{(N)}, \dots, t_{k_N}^{(N)} \end{array} \right\} \right], \quad (7)$$

35

wobei mit

- s die Eingangsgrößen bezeichnet werden,
- $t_m^{(n)}$ ein Impuls bezeichnet wird, der von einem gepulsten Neuron n zu einem Zeitpunkt m innerhalb eines Zeitraums $[0, T]$ generiert wird,
- 5 • mit k_n ($n = 1, \dots, N$) ein Zeitpunkt bezeichnet wird, zu dem das gepulste Neuron n den innerhalb des Zeitraums $[0, T]$ letzten Impuls generiert hat,
- ~~• N eine Anzahl in dem Neuronalen Netz enthaltener gepulster Neuronen bezeichnet wird.~~

10

In einer weiteren Ausgestaltung genügt der erste Unterscheidungswert folgender Vorschrift

$$I(T) = -\int p(\text{out}) \cdot \ln(p(\text{out})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)} + \\ + \sum_{j=1}^S p_j \int p(\text{out}|s^{(j)}) \cdot \ln(p(\text{out}|s^{(j)})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)} \quad (8)$$

15

mit

$$p(\text{out}) = \sum_{j=1}^S p_j p(\text{out}|s^{(j)}), \quad (9)$$

20 wobei mit

- $s^{(j)}$ eine Eingangsgröße bezeichnet wird, die an das Neuronale Netz zu einem Zeitpunkt j angelegt wird,
- p_j eine Wahrscheinlichkeit dafür bezeichnet wird, daß zu einem Zeitpunkt j die Eingangsgröße $s^{(j)}$ an das Neuronale Netz angelegt wird,
- 25 • $p(\text{out}|s^{(j)})$ eine bedingte Wahrscheinlichkeit dafür bezeichnet wird, ein Impuls von einem gepulsten Neuron in dem Neuronalen Netz generiert wird unter der Bedingung, daß zu einem Zeitpunkt j die Eingangsgröße $s^{(j)}$ an das Neuronale Netz an-
- 30 gelegt wird.

Die Trainings-Folgen von Eingangsgrößen sind bevorzugt gemessene physikalische Signale.

- 5 Somit sind die Verfahren und die Anordnungen im Rahmen der Beschreibung eines technischen Systems, insbesondere zur Beschreibung bzw. Untersuchung eines mehrkanaligen Signals, welches durch einen Elektroencephalographen aufgenommen worden ist und ein Elektroencephalogramm beschreibt, einsetzbar.
-

10

Die Verfahren und die Anordnungen können ferner zur Analyse multivarianter Finanzdaten in einem Finanzmarkt zur Analyse ökonomischer Zusammenhänge eingesetzt werden.

- 15 Die beschriebenen Verfahrensschritte können sowohl in Software für den Prozessor als auch in Hardware, d.h. mittels einer Spezialschaltung, realisiert werden.

- 20 Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in den Figuren dargestellt und wird im weiteren näher erläutert.

Es zeigen

- 25 Figur 1 ein Ablaufdiagramm, indem die einzelnen Verfahrensschritte des Ausführungsbeispiels dargestellt sind;

Figur 2 eine Skizze eines Elektroencephalographen und einem Patienten für den ein Elektroencephalogramm erstellt wird;

30

Figur 3 eine Skizze eines neuronalen Netzes gemäß dem Ausführungsbeispiel;

- 35 Figur 4 eine Skizze, anhand der das Prinzip, welches dem Ausführungsbeispiel zugrunde liegt, dargestellt wird.

Fig.2 zeigt einen Patienten 200, an dessen Kopf 201 Sensoren 202, 203, 204, 205 und 206 angebracht sind zur Aufnahme von Gehirnstömen. Von den Sensoren 202, 203, 204, 205, 206 aufgenommene elektrische Signale 207, 208, 209, 210 und 211 werden

5 einem Elektroencephalographen 220 über eine erste Eingangs-/Ausgangsschnittstelle 221 zugeführt. Der Elektroencephalograph 220 weist mehrere Eingangskanäle auf. Über die Eingangs-/Ausgangsschnittstelle 221, die mit einem Analog-/Digital-Wandler 222 verbunden ist, werden die elektrischen

10 Signale dem Elektroencephalographen 220 zugeführt und in dem Analog-/Digital-Wandler 222 digitalisiert und jedes aufgenommene elektrische Signal wird als eine Folge von Zeitreihenwerten in einem Speicher 223 gespeichert.

15 Somit ist eine Folge von Zeitreihenwerten durch ein Abtastintervall sowie durch eine Zeitdauer, im weiteren als Zeitraum bezeichnet, charakterisiert, während der jeweils ein elektrisches Signal aufgenommen wird. Der Speicher 223 ist mit dem Analog-/Digital-Wandler 222 sowie mit einem Prozessor 224 und

20 einer zweiten Eingangs-/Ausgangsschnittstelle 225 über einen Bus 226 verbunden.

Mit der zweiten Eingangs-/Ausgangsschnittstelle 225 ist ferner über ein erstes Kabel 227 ein Bildschirm 228, über ein

25 zweites Kabel 229 eine Tastatur 230 und über ein drittes Kabel 231 eine Computermouse 232 verbunden.

Auf dem Bildschirm 228 werden Ergebnisse der Untersuchung des Patienten 200 dargestellt. Über die Tastatur 230 bzw. die

30 Computermouse 232 können von einem Benutzer (nicht dargestellt) Eingaben in das System erfolgen.

Der Prozessor 224 ist derart eingerichtet, daß die im weiteren beschriebenen Verfahrensschritte durchführbar sind.

Jeweils eine Folge von Zeitreihenwerten sowie eine Angabe, welcher Klasse von Zeitreihenwerten die Folge von Zeitreihenwerten zuzuordnen ist, bilden ein Trainingsdatum.

- 5 Eine Vielzahl von Trainingsdaten bilden einen Trainingsdatensatz, mit dem ein im weiteren beschriebenes neuronales Netz 301 trainiert wird.

Fig.3 zeigt das neuronale Netz 301 mit gepulsten Neuronen.

10

An jeweils ein Eingangsneuron 302, 303, 304 einer Eingangsschicht 305 wird jeweils eine Folge 306, 307, 308 von Zeitreihenwerten angelegt. Jeder angelegter Folge 306, 307, 308 von Zeitreihenwerten ist im Rahmen des Trainingsverfahrens eine Angabe zugeordnet, ob es sich bei dieser Folge 306, 307, 308 der Zeitreihenwerte, im weiten als Eingabemuster 306, 307, 308 bezeichnet, um ein Eingabemuster 306, 307, 308 einer ersten Klasse oder um ein Eingabemuster 306, 307, 308 einer zweiten Klasse handelt.

20

Jeweils ein Eingangsneuron 302, 303, 304 ist mit einem Zwischenneuron 309, 310, 311 einer Zwischenschicht 312 jeweils über eine gewichtete Verbindung 313, 314, 315 verbunden.

25

Die Zwischenneuronen 309, 310, 311 sind miteinander über Verbindungen 316, 317, 318, 319, 320, 321 verbunden, die ebenfalls gewichtet sind.

30

Die Zwischenneuronen 309, 310, 311 sind ferner mit weiteren gepulsten Neuronen 322, 323, 324 über gewichtete Verbindungen 325, 326, 327, 328, 329 und 330 verbunden.

35

Die gepulsten Neuronen weisen jeweils das oben beschriebene Verhalten auf, welches in [2] dargestellt ist.

Die Zwischenneuronen 309, 310, 311 sind mit mehreren Zwischenneuronen 309, 310, 311 verbunden, jeweils die weiteren

gepulsten Neuronen 322, 323, 324 sind jeweils mit genau einem Zwischenneuron 309, 310, 311 verbunden. Auf diese Weise ist es möglich, eine lang reichende Beeinflussung zwischen Neuronen eines neuronalen Netzes sowie auch eine lokale Beeinflussung von Neuronen innerhalb des Neuronalen Netzes zu modellieren.

Mit den weiteren gepulsten Neuronen 322, 323, 324 ist ein Ausgangsneuron 331 über gewichtete Verbindungen 332, 333 und 334 verbunden. Von dem Ausgangsneuron 331 wird ein Ausgangssignal 335 gebildet, mit dem angegeben wird, welcher Klasse das Eingabemuster 306, 307, 308 zugehörig ist.

In der Trainingsphase des neuronalen Netzes 301 wird die Ausgangsgröße 335 mit der dem jeweiligen Eingabemuster zugeordneten Klassifikationsangabe verglichen und es wird ein Fehlersignal E gebildet, welches verwendet wird zur Anpassung der Gewichte, der in dem Neuronalen Netz 301 vorhandenen Verbindungen zwischen den Neuronen.

Als Trainingsverfahren wird im Rahmen dieses Ausführungsbeispiels das nicht gradientenbasierte Verfahren gemäß dem ALOPEX-Verfahren eingesetzt. Das Ziel des ALOPEX-Verfahrens ist die Minimierung eines Fehlermaßes E unter Berücksichtigung und Adaptierung der Gewichte w_{bc} für einen Trainingsdatensatz.

Das ALOPEX-Verfahren wird im weiteren näher erläutert.

Ein Neuron b ist mit einem Neuron c über eine Verbindung verbunden, die mit dem Gewicht w_{bc} gewichtet ist. Während einer f -ten Iteration wird das Gewicht w_{bc} gemäß folgender Vorschrift aktualisiert:

$$w_{bc}(f) = w_{bc}(f - 1) + \delta_{bc}(f), \quad (10)$$

wobei mit $\delta_{bc}(f)$ eine kleine positive oder negative vorgegebene Schrittweite δ gemäß folgender Vorschrift bezeichnet wird:

$$5 \quad \delta_{bc}(f) = \begin{cases} -\delta & \text{mit einer Wahrscheinlichkeit } p_{bc}(f) \\ +\delta & \text{mit einer Wahrscheinlichkeit } 1 - p_{bc}(f) \end{cases} \quad (11)$$

Eine Wahrscheinlichkeit $p_{bc}(f)$ wird gebildet gemäß folgender Vorschrift:

$$10 \quad p_{bc}(f) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{C_{bc}(f)}{T(f)}}}, \quad (12)$$

wobei $C_{bc}(f)$ gemäß folgender Vorschrift gebildet wird:

$$C_{bc}(f) = \Delta w_{bc}(f) \cdot \Delta E(f). \quad (13)$$

15

Mit $T(f)$ wird ein vorgebbare Wert bezeichnet. Mit $\Delta w_{bc}(f)$ und $\Delta E(f)$ werden die Gewichtsänderungen $\Delta w_{bc}(f)$ der Gewichte w_{bc} bzw. die Änderung $\Delta E(f)$ des Fehlermaßes E während der vorangegangenen zwei Iterationen bezeichnet gemäß folgenden

20 Vorschriften:

$$\Delta w_{bc}(f) = w_{bc}(f-1) + w_{bc}(f-2), \quad (14)$$

$$\Delta E_{bc}(f) = E_{bc}(f-1) + E_{bc}(f-2). \quad (15)$$

25

Der vorgegebene Wert $T(f)$ wird alle F Iterationen aktualisiert gemäß folgender Vorschrift:

$$T(f) = \frac{1}{FM} \sum_b \sum_c \sum_{f'=f-F}^{f-1} |C_{bc}(f')| \quad (16)$$

30 wenn f ein ganzzahliges Vielfaches von F ist, und

$$T(f) = T(f-1) \quad \text{sonst,} \quad (17)$$

wobei mit M eine Anzahl von Verbindungen in dem neuronalen Netz 301 bezeichnet wird.

5 Gleichung (16) kann vereinfacht werden zu folgender Vorschrift:

$$T(f) = \frac{\delta}{F} \sum_{f'=f-F}^{f-1} |\Delta E(f')|. \quad (18)$$

10 Das neuronale Netz 301 wird unter Verwendung des Trainingsdatensatzes gemäß dem oben beschriebenen Trainingsverfahren trainiert.

15 Ferner wird ein erster Unterscheidungswert $I(T)$ für das neuronale Netz 301 gemäß folgender Vorschrift gebildet:

$$I(T) = I \left[s; \left\{ t_1^{(1)}, \dots, t_m^{(1)}, \dots, t_{k_1}^{(1)}, t_1^{(2)}, \dots, t_m^{(2)}, \dots, t_{k_2}^{(2)}, \dots, \right. \right. \\ \left. \left. t_1^{(n)}, \dots, t_m^{(n)}, \dots, t_{k_n}^{(n)}, \dots, t_1^{(N)}, \dots, t_m^{(N)}, \dots, t_{k_N}^{(N)} \right\} \right], \quad (19)$$

wobei mit

- s die Eingangsgrößen bezeichnet werden,
- 20 • $t_m^{(n)}$ ein Impuls bezeichnet wird, der von einem gepulsten Neuron n zu einem Zeitpunkt m innerhalb eines Zeitraums $[0, T]$ generiert wird,
- mit k_n ($n = 1, \dots, N$) ein Zeitpunkt bezeichnet wird, zu dem das gepulste Neuron n den innerhalb des Zeitraums
- 25 $[0, T]$ letzten Impuls generiert hat,
- N eine Anzahl in dem Neuronalen Netz enthaltener gepulster Neuronen bezeichnet wird.

30 Der erste Unterscheidungswert $I(T)$ entspricht anschaulich der Differenz folgender Entropien:

$$I(T) = H(\text{out}) - \langle H(\text{out}|s) \rangle_s, \quad (20)$$

mit

$$H(\text{out}) = - \int p(\text{out}) \cdot \ln(p(\text{out})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)} \quad (21)$$

5

und

$$\langle H(\text{out}|s) \rangle_s = - \sum_{j=1}^S p_j \int p(\text{out}|s^{(j)}) \cdot \ln(p(\text{out}|s^{(j)})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)} . \quad (22)$$

10

Damit ergibt sich der erste Unterscheidungswert $I(T)$ gemäß folgender Vorschrift:

$$I(T) = - \int p(\text{out}) \cdot \ln(p(\text{out})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)} + \\ + \sum_{j=1}^S p_j \int p(\text{out}|s^{(j)}) \cdot \ln(p(\text{out}|s^{(j)})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)} \quad (23)$$

15

mit

$$p(\text{out}) = \sum_{j=1}^S p_j p(\text{out}|s^{(j)}) , \quad (24)$$

20 wobei mit

- $s^{(j)}$ eine Eingangsgröße bezeichnet wird, die an das Neuronale Netz zu einem Zeitpunkt j angelegt wird,
- p_j eine Wahrscheinlichkeit dafür bezeichnet wird, daß zu einem Zeitpunkt j die Eingangsgröße $s^{(j)}$ an das Neuronale Netz angelegt wird,
- 25 • $p(\text{out}|s^{(j)})$ eine bedingte Wahrscheinlichkeit dafür bezeichnet wird, ein Impuls von einem gepulsten Neuron in dem Neuronalen Netz generiert wird unter der Bedingung, daß zu einem

Zeitpunkt j die Eingangsgröße $s^{(j)}$ an das Neuronale Netz angelegt wird.

Ist im Rahmen des Trainings des neuronalen Netzes 301 ein maximaler erster Unterscheidungswert $I(T)$ ermittelt worden, so bedeutet dies, daß das in dem ersten Zeitraum beobachtete Eingangsmuster 306, 307, 308 genug Information enthält, um mit ausreichender Verlässlichkeit das Eingabemuster zu klassifizieren.

10

Anschaulich wird im Rahmen des Trainings für einen ersten Zeitraum $[0; T]$ der erste Unterscheidungswert $I(T)$ gebildet (Schritt 101) (vgl. Fig.1).

15 In einem weiteren Schritt (Schritt 102) wird ein zweiter Zeitraum durch Verkürzung des ersten Zeitraums gebildet:

$[0; T']$, wobei $T' < T$.

20 Für den zweiten Zeitraum $[0; T']$ wird in einem weiteren Schritt (Schritt 103) ein zweiter Unterscheidungswert $I(T')$ auf die gleiche, oben beschriebene Weise wie der erste Unterscheidungswert $I(T)$ gebildet.

25 Der erste Unterscheidungswert $I(T)$ wird mit dem zweiten Unterscheidungswert $I(T')$ verglichen (Schritt 104).

Ist der zweite Unterscheidungswert $I(T')$ gleich dem ersten Unterscheidungswert $I(T)$, so wird ein neuer zweiter Zeitraum durch Verkürzung des zweiten Zeitraums $[0; T']$ gebildet (Schritt 105) und der neue zweite Zeitraum wird als der zweite Zeitraum angesehen (Schritt 106). Für den zweiten Zeitraum der neuen Iteration wird wiederum ein zweiter Unterscheidungswert $I(T')$ (Schritt 103) gebildet.

35

Anschaulich bedeutet dieses iterative Verfahren, daß der Zeitraum, in dem von den gepulsten Neuronen generierte Impul-

se berücksichtigt werden zur Bildung des Ausgangssignals solange verkürzt wird, bis der zweite Unterscheidungswert $I(T')$ ungleich dem ersten Unterscheidungswert $I(T)$ ist.

- 5 Ist der zweite Unterscheidungswert $I(T')$ kleiner als der erste Unterscheidungswert, so wird das neuronale Netz 301 als optimiertes neuronales Netz betrachtet, welches in der letzten vorangegangenen Iteration trainiert wurde, bei dem der zweite Unterscheidungswert $I(T')$ nicht kleiner als der erste Unterscheidungswert $I(T)$ war (Schritt 107).
-

- 15 Der jeweils berücksichtigte Zeitraum wird in diskrete Unterzeiträume unterteilt, für die jeweils lediglich ermittelt wird, ob während dieses Unterzeitraums ein Neuron einen Impuls generiert hat oder nicht.

Auf diese Weise wird der für das Training benötigte Rechenaufwand erheblich reduziert.

- 20 Zur weiteren Veranschaulichung wird das Prinzip anhand Fig.4 noch einmal erläutert.

- 25 Fig.4 zeigt zwei kontinuierliche Prozesse $p1$ und $p2$, die durch eine Menge von kontinuierlichen Eingangssignalen $S1$ und $S2$ gebildet sind. Nach entsprechender, oben beschriebener Digitalisierung liegen zwei Folgen von Eingangsgrößen vor, die Eingabemuster. Die Eingabemuster werden dem trainierten neuronalen Netz 401 in einer Anwendungsphase zugeführt, und es wird anhand der Zeitreihen für das trainierte neuronale Netz 30 401 anschaulich eine raum-zeitliche Codierung der Prozesse $p1$, $p2$ durchgeführt.

- Anhand eines Ausgangssignals 402 wird durch das trainierte neuronale Netz 401 angegeben, um welche Art von Prozeß es 35 sich bei dem Eingabemuster handelt. Das trainierte neuronale Netz 401 weist die Eigenschaft auf, daß zum einen die Zuverlässigkeit der Klassifikation optimiert ist und zum anderen

eine minimale Anzahl von Zeitreihenwerten, also ein minimaler zweiter Zeitraum 403 erforderlich ist, um die Klassifikation verlässlich durchzuführen.

- 5 Im weiteren werden einige Alternativen zu dem oben beschriebenen Ausführungsbeispiel dargestellt:

-
- 10 Die Anzahl von Eingängen, gepulsten Neuronen sowie Ausgangssignalen ist im allgemeinen beliebig. Auch die Anzahl verschiedener Folgen von Zeitreihenwerten im Rahmen der Klassifikation sowie des Trainings ist beliebig. Damit ist eine Elektroencephalogramm-Analyse für eine beliebige Anzahl von Kanälen zur Tumorcharakterisierung möglich.

In diesem Dokument sind folgende Veröffentlichungen zitiert:

- 5 [1] G. Deco und B. Schürmann, Information Transmission and
Temporal Code in Central Spiking Neurons, Physical Re-
view Letters, Vol. 79, Nr. 23, S. 4697 - 4700, December
1997
- 10 [2] W. Gerstner, Time structure of the activity in neural
network models, Physical Review E, Vol. 51, Nr. 1,
S. 738 - 758, January 1995
- 15 [3] K.P. Unnikrishnan and K.P. Venugopal, Alopex: A Correla-
tion-Based Learning Algorithm for Feedforward and Recur-
rent Neural Networks, S. 471 - 490, Neural Computation,
Vol. 6, 1994

Patentansprüche

1. Verfahren zum Trainieren eines Neuronalen Netzes, welches gepulste Neuronen enthält,

- 5 a) bei dem für einen ersten Zeitraum ($[0;T]$) das Neuronale Netz derart trainiert wird, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird, wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
-
- 10 b) bei dem der Unterscheidungswert abhängig ist von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgrößen, die dem Neuronalen Netz zugeführt werden,
- 15 c) bei dem iterativ folgende Schritte durchgeführt werden:
- der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum verkürzt,
- für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,
- ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten
- 20 Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangeegangenen Iteration gebildet wird,
- sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte
- 25 Neuronale Netz ist das Neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

- 30 bei dem zur Maximierung des ersten Unterscheidungswerts und/oder des zweiten Unterscheidungswerts ein nichtgradientenbasiertes Optimierungsverfahren eingesetzt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2,

- 35 bei dem das Optimierungsverfahren auf dem ALOPEX-Verfahren basiert.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,
bei dem der erste Unterscheidungswert $I(T)$ folgender Vorschrift genügt:

$$5 \quad I(T) = I\left(s; \left\{ \begin{array}{l} t_1^{(1)}, \dots, t_m^{(1)}, \dots, t_{k_1}^{(1)}, t_1^{(2)}, \dots, t_m^{(2)}, \dots, t_{k_2}^{(2)}, \dots, \\ t_1^{(n)}, \dots, t_m^{(n)}, \dots, t_{k_n}^{(n)}, \dots, t_1^{(N)}, \dots, t_m^{(N)}, \dots, t_{k_N}^{(N)} \end{array} \right\} \right),$$

wobei mit

- s die Eingangsgrößen bezeichnet werden,
- $t_m^{(n)}$ ein Impuls bezeichnet wird, der von einem gepulsten Neuron n zu einem Zeitpunkt m innerhalb eines Zeitraums $[0, T]$ generiert wird,
- mit k_n ($n = 1, \dots, N$) ein Zeitpunkt bezeichnet wird, zu dem das gepulste Neuron n den innerhalb des Zeitraums $[0, T]$ letzten Impuls generiert hat,
- 15 • N eine Anzahl in dem Neuronalen Netz enthaltener gepulster Neuronen bezeichnet wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4,
bei dem der erste Unterscheidungswert $I(T)$ folgender Vorschrift genügt:

$$\begin{aligned} I(T) = & -\int p(\text{out}) \cdot \ln(p(\text{out})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)} + \\ & + \sum_{j=1}^S p_j \int p(\text{out}|s^{(j)}) \cdot \ln(p(\text{out}|s^{(j)})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)} \end{aligned}$$

mit

$$25 \quad p(\text{out}) = \sum_{j=1}^S p_j p(\text{out}|s^{(j)}),$$

wobei mit

- $s^{(j)}$ eine Eingangsgröße bezeichnet wird, die an das Neuronale Netz zu einem Zeitpunkt j angelegt wird,
- p_j eine Wahrscheinlichkeit dafür bezeichnet wird, daß zu einem Zeitpunkt j die Eingangsgröße $s^{(j)}$ an das Neuronale Netz angelegt wird,
- $p(\text{out}|s^{(j)})$ eine bedingte Wahrscheinlichkeit dafür bezeichnet wird, ein Impuls von einem gepulsten Neuron in dem Neuronalen Netz generiert wird unter der Bedingung, daß zu einem Zeitpunkt j die Eingangsgröße $s^{(j)}$ an das Neuronale Netz angelegt wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, bei dem die Trainings-Folge von Eingangsgrößen gemessene physikalische Signale sind.

15

7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem die Trainings-Folge von Eingangsgrößen gemessene Signale eines Electroencephalogramms sind.

8. Verfahren zur Klassifikation einer Folge von Eingangsgrößen unter Verwendung eines Neuronalen Netzes, welches gepulste Neuronen enthält und gemäß folgenden Schritten trainiert worden ist:

- a) für einen ersten Zeitraum wird das Neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird, wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
- b) der Unterscheidungswert ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgrößen, die dem Neuronalen Netz zugeführt werden,
- c) iterativ werden folgende Schritte durchgeführt:
 - der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum verkürzt,
 - für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,

- ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangeegangenen Iteration gebildet wird,
 - sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte Neuronale Netz ist das Neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist,
-
- bei dem die Folge von Eingangsgrößen dem Neuronalen Netz zugeführt wird,
 - bei dem ein Klassifikationssignal gebildet wird, mit dem angegeben wird, welcher Art einer Folge von Eingangsgrößen die zugeführte Folge ist.
9. Verfahren nach Anspruch 8,
bei dem die Trainings-Folge von Eingangsgrößen und die Folge von Eingangsgrößen gemessene physikalische Signale sind.
10. Verfahren nach Anspruch 9,
bei dem die Trainings-Folge von Eingangsgrößen und die Folge von Eingangsgrößen gemessene Signale eines Electroencephalogramms sind.
11. Neuronales Netz, welches gepulste Neuronen enthält und gemäß folgenden Schritten trainiert worden ist:
- a) für einen ersten Zeitraum wird das Neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird, wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
 - b) der Unterscheidungswert ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgrößen, die dem Neuronalen Netz zugeführt werden,
 - c) iterativ werden folgende Schritte durchgeführt:
 - der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum verkürzt,

- für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,
 - ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit
 - 5 einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangeegangenen Iteration gebildet wird,
 - sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte
 - Neuronale Netz ist das Neuronale Netz der letzten Itera-
 - 10 tion, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist.
11. Neuronales Netz nach Anspruch 10, eingesetzt zur Klassi-
- 15 fikation eines physikalischen Signals.
12. Neuronales Netz nach Anspruch 10, eingesetzt zur Klassi-
- fikation eines Signals eines Electroencephalogramms.
13. Anordnung zum Trainieren eines Neuronalen Netzes, welches
- 20 gepulste Neuronen enthält,
- mit einem Prozessor, der derart eingerichtet ist, daß folgende Schritte durchführbar sind:
- a) für einen ersten Zeitraum wird das Neuronale Netz derart
- trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird,
- 25 wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
- b) der Unterscheidungswert ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Ein-
- 30 gangsgrößen, die dem Neuronalen Netz zugeführt werden,
- c) iterativ werden folgende Schritte durchgeführt:
- der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum ver-
- kürzt,
- für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterschei-
- 35 dungswert gebildet,
- ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit

einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangeegangenen Iteration gebildet wird,

- 5 - sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte Neuronale Netz ist das Neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist.

10 14. Anordnung nach Anspruch 13, eingesetzt zur Klassifikation eines physikalischen Signals.

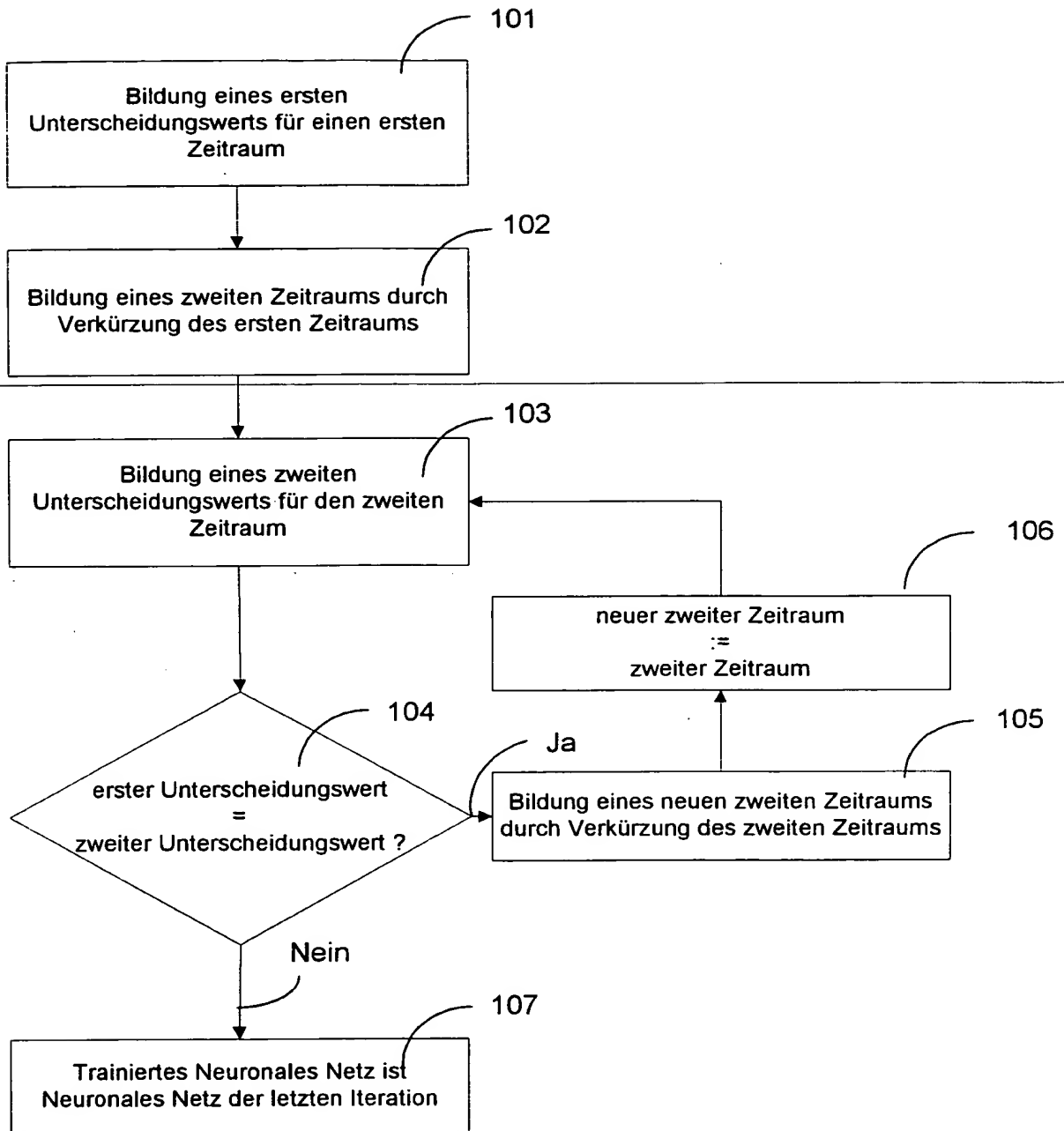
15. Anordnung nach Anspruch 13, eingesetzt zur Klassifikation eines Signals eines Electroencephalogramms.

Zusammenfassung

Verfahren zum Trainieren eines neuronalen Netzes, Verfahren zur Klassifikation einer Folge von Eingangsgrößen unter Verwendung eines neuronalen Netzes, neuronales Netz und Anordnung zum Trainieren eines neuronalen Netzes

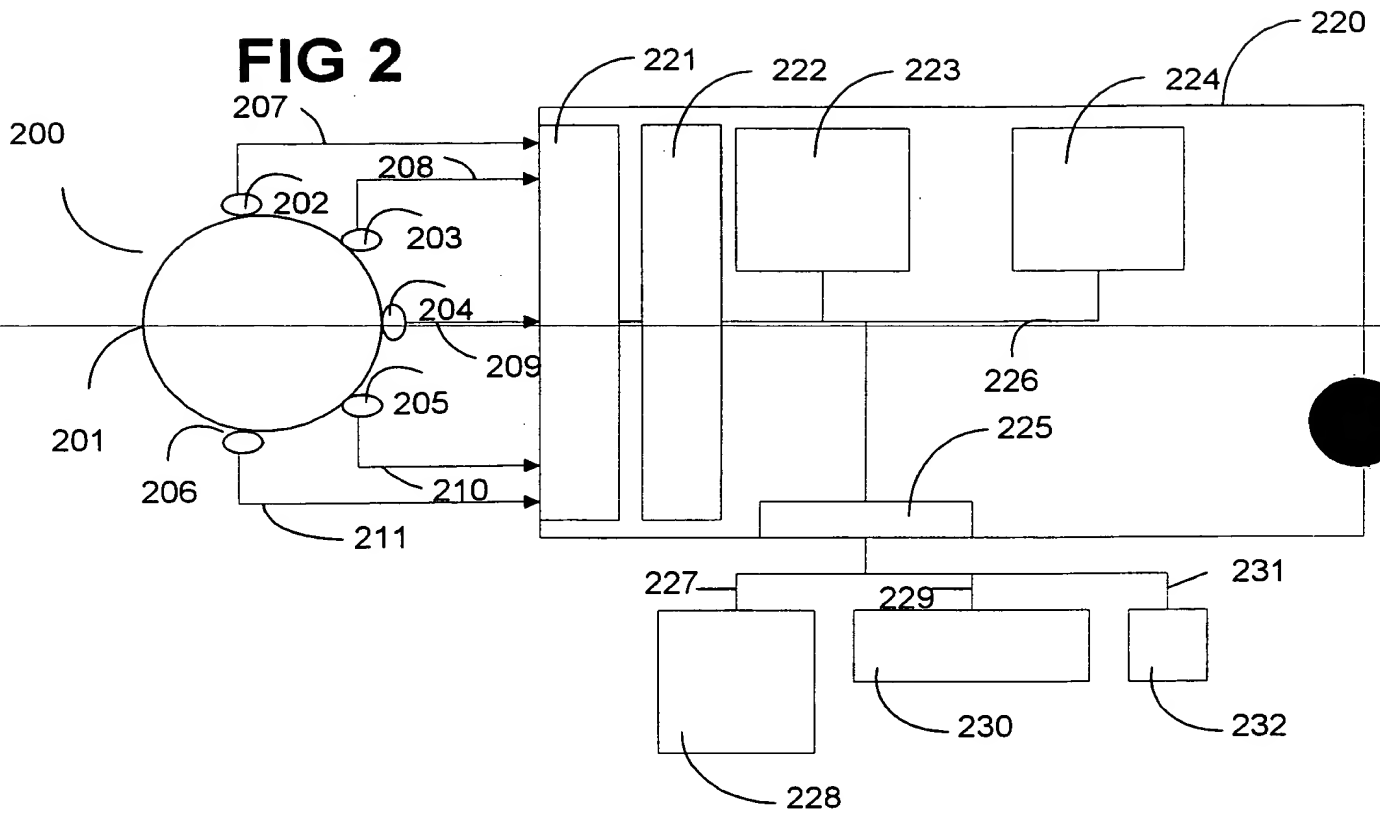
Für einen ersten Zeitraum wird das neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird, wobei
10 der Unterscheidungswert abhängig ist von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden. Iterativ wird der erste Zeitraum so lange verkürzt und für den zweiten Zeitraum ein zweiter Unterscheidungswert gebildet bis der zweite Unterscheidungswert kleiner
15 ist als der maximale Unterscheidungswert. Das trainierte neuronale Netz ist das neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem maximalen Unterscheidungswert ist.

FIG 1



2/4

FIG 2



314

FIG 3

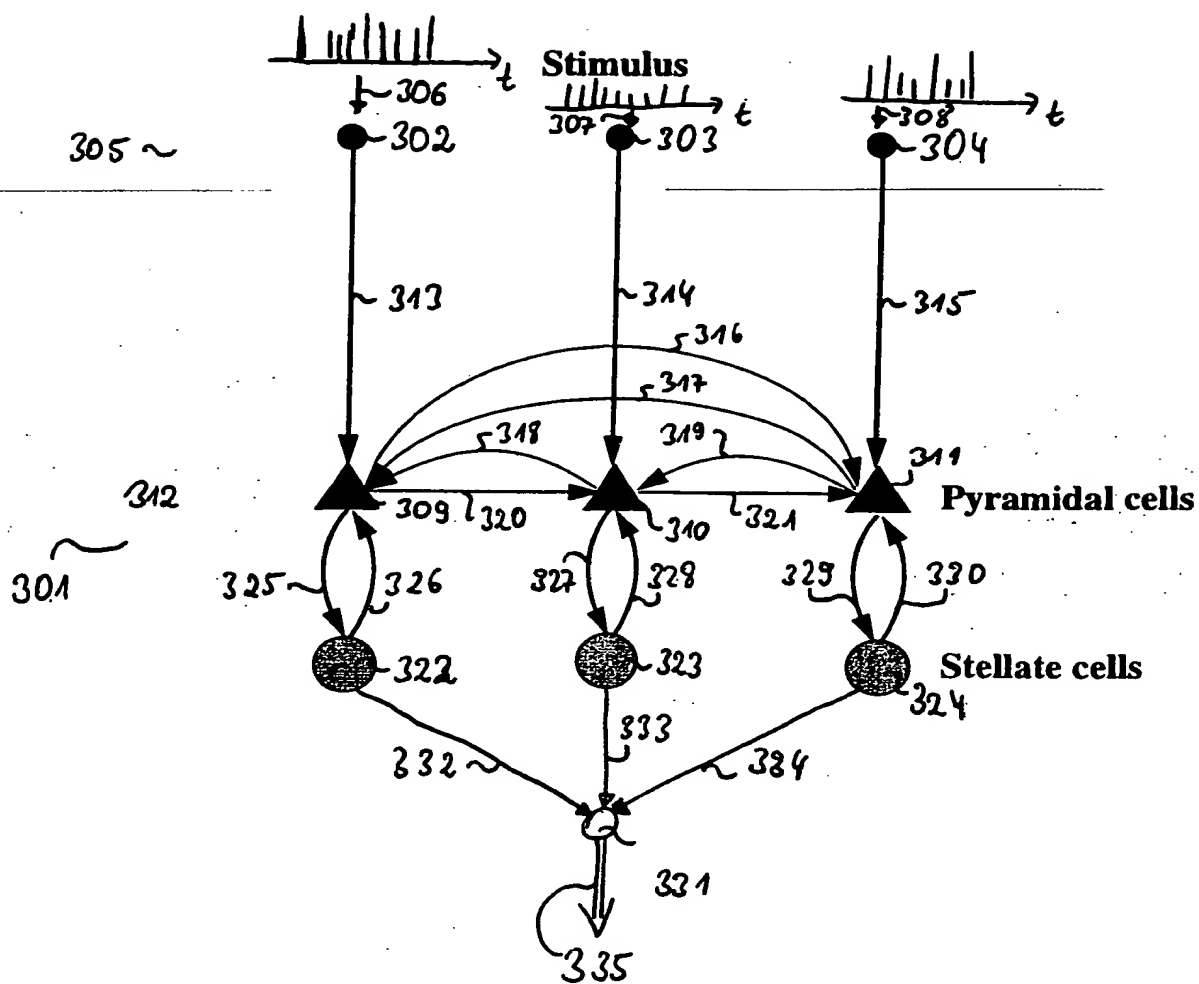


FIG 4

4/4

